智能电网背景下电能质量问题的物理机制与调控路径

刘李萌
驻马店职业技术学院　河南驻马店　463000

摘　要：在智能电网快速发展的背景下，电能质量问题日益复杂，已成为制约电力系统稳定运行的重要因素。本文分析了电能质量问题的主要类型与物理机制，梳理了当前调控路径及其技术演进方向，并结合智能电网的新需求，提出了“理实一体化”人才培养机制。通过课程体系优化、实践平台建设、产教融合与教师队伍提升等措施，构建起面向工程应用的复合型人才培养路径，为高校教学改革和行业人才供给提供理论依据与实践思路。

关键词：智能电网；电能质量；调控机制；人才培养；课程体系；实践教学

在智能电网快速发展的背景下，电能质量问题成为制约电网安全与用能设备稳定运行的重要因素。与传统电网相比，智能电网中分布式能源、电力电子设备、大规模电动汽车等新型负载的大量接入，使得电压波动、谐波污染、暂态扰动等问题呈现出频繁化、复杂化、多源化的趋势。这类问题不仅会影响电能的稳定传输，还会对用电设备的寿命、系统的能效水平产生不利影响。因此，如何准确识别电能质量问题的物理机制，并构建高效的调控路径，成为当前电力系统研究与工程实践的关键课题之一。然而，从人才培养角度来看，当前高校在电能质量调控方向的人才体系建设仍显薄弱，存在理论教学与实践应用脱节、课程设置针对性不强、学生跨学科能力不足等问题。为此，本文拟以电能质量问题为核心，以智能电网环境为背景，系统探讨其物理机制与调控策略，并在此基础上提出面向该领域的“理实一体化”人才培养机制，以期为高校相关专业教育改革与工程型人才储备提供理论支持与实践路径。

1 电能质量问题的物理机制分析

随着智能电网架构的不断演进，电能质量问题呈现出比传统电网更为复杂和动态的特征。电能质量主要指电压、频率、电流波形等参数的稳定性与规范性，其核心问题包括电压暂降与上升、电压闪变、谐波失真、频率波动、暂态过电压等。尤其在高比例接入新能源、用电负载结构不断变化的背景下，这些问题愈发显著。例如，电动汽车集中充电引起局部供电压降，分布式光伏出力波动导致逆变器输出谐波增加，电力电子设备频繁启停诱发暂态扰动等。

电能质量问题的根源在于电网系统的物理结构与运行机理变化。首先，电力电子设备的广泛应用使得电网中的非线性负载比例显著上升，系统波形失真程度加剧。其次，分布式能源的大规模并网使得电网功率流呈现出双向、多路径特性，电压和电流的瞬态响应变得更加不可预测。再次，智能控制系统的引入虽提高了网架调节效率，但控制逻辑之间的协同也可能因时延和数据误差引发新的谐振问题。例如，多个 SVG 设备在同一节点同时调节电压可能引发共振，反而使电压更加不稳定。

智能电网中新型负载如数据中心、电动车、储能系统等，其快速功率波动对电能质量构成直接威胁。这些设备具有快速动态响应特性，一旦控制策略设置不合理，极易引发频率或电压扰动。而现有的保护机制往往依赖固定阈值判断，难以及时响应此类复杂扰动，甚至造成误切误控。

在未来的发展趋势中，电能质量问题将进一步呈现出“多源叠加、随机突变、交互耦合”的特点。一方面，更多物理系统（如楼宇、交通、工业生产）与电力系统深度耦合，形成大规模能量交互网络；另一方面，虚拟电厂、源网荷储协同调控平台的引入，使得系统运行状态更加动态，对电能质量的实时感知与控制能力提出更高要求。

2 电能质量调控技术路径及人才能力要求

2.1 当前调控技术路径及其局限性

在智能电网运行环境中，传统电能质量调控技术主要包括无源滤波器、静止无功补偿器（SVC）、有源滤波器（APF）、动态电压恢复器（DVR）等。这些技术手段在固定负载和稳态运行条件下具有一定治理效果，但面对智能电网中负载多变、能源双向流动、电力电子设备频繁切换等新特性时，其

性能显得力不从心。例如，传统无源滤波器常出现选频偏差和带宽覆盖不足的问题，容易在频率漂移场景下失效；APF 则面临成本高昂、控制响应延迟等难题；而基于固定阈值的控制策略，难以在扰动初期准确识别并快速响应，易引发误切或误调现象。此外，电能质量治理过程中常存在“局部治理、全局扰动”的现象。以某工业园区为例，分布式光伏集中接入后，其 APF 单独调节谐波导致配电系统中出现频率不稳定现象，最终不得不采取全网重新配置补偿方案。这说明传统调控路径缺乏系统级耦合响应能力，急需新的调控思路予以支撑。

2.2 智能化调控策略与发展趋势

为应对智能电网中电能质量问题的复杂性与动态性，近年来调控策略正向智能化、协同化、数据驱动等方向演进。新一代调控技术更强调在线感知、边缘计算和预测控制的能力。例如，通过部署高密度智能监测设备，实时采集电压、电流、频率等多维数据，并借助深度学习模型（如 LSTM、GRU）实现短时预测，可提前发出调控指令，显著提升系统响应速度。在某省调度中心的试点项目中，利用神经网络模型预测 10 分钟内谐波变化趋势，提前 3 秒触发动态滤波机制，有效缓解了功率波动对主设备的冲击。此外，分布式协同控制也成为趋势。以多台 SVG 联合运行为例，边缘控制器通过区域能量流量和电压曲线进行动态协调，避免控制重叠和逆向补偿，提高了整体调控效率。再如，采用“集中调度 + 本地自主”的多层控制架构，使电压稳定与谐波治理可并行执行，提升了系统可靠性。

2.3 面向未来的核心人才能力需求

随着调控路径的技术升级，相应的人才能力模型也需同步重塑。首先，系统建模能力是基础，要求掌握电力系统的动态特性与数学模型，能将新能源发电、电力电子器件、负荷侧扰动等因素纳入统一建模框架。其次，控制算法设计能力至关重要，包括谐波检测方法（如 FFT、小波变换）、补偿策略（如基于 PI 或 MPC 控制的电压 / 电流调节）、自适应参数整定等内容。未来电能质量治理高度依赖高频采样与大数据处理，学生必须掌握 Python、MATLAB 等工具，具备时序数据建模、特征提取与模型训练能力。此外，对硬件系统和工程现场的理解同样不可或缺。学生需熟悉设备接线、接口协议、响应曲线、能量转换特性等，确保调控策略能在真实系统中有效部署。

以某高校 2024 届电力系统方向研究生能力调研为例，参与者中仅有 38% 表示具备基本的数据建模能力，约 45% 的学生未曾使用过 MATLAB 进行电能质量仿真。这显示目前高校在复合型能力构建上存在明显缺口，课程内容与技术应用之间存在“知识断层”。

2.4 教学内容滞后与能力培育瓶颈

当前高校相关专业仍以传统电力系统课程体系为主，强调稳态分析、故障计算等基础内容，忽视了电能质量问题的多尺度、多源特性。部分“电能质量基础”课程缺乏案例支撑，仅停留在谐波定义和滤波方式介绍层面，导致学生难以形成系统认知。另一方面，课程设置中理论与工程实践分离，实验课程多为仿真演示或简化模拟，无法反映实际电网中的负荷动态与调控策略差异。因此，仅靠教材传授和期末考试难以满足复合型人才的培养需求。必须通过重构课程内容、引入真实案例、加强项目制训练、拓展交叉学科融合等方式，推动电能质量人才的培养体系真正贴近技术发展和产业应用。

3 面向电能质量问题的“理实一体化”人才培养机制构建

在智能电网快速发展、电能质量问题愈加复杂的背景下，传统以理论为主、实践为辅的人才培养模式难以满足行业对复合型技术人才的需求。因此，需建立集知识传授、技能训练与工程思维为一体的“理实一体化”人才培养机制，推动高校电气类专业在教学内容、实践平台、校企协作等方面进行系统革新。

3.1 教学内容重构与课程体系优化

首先，应从课程顶层设计入手，构建面向电能质量调控的模块化课程体系。课程设置应覆盖电能质量基础理论、电能质量测量与分析、电能质量调控技术、电力电子设备干扰机理等核心内容，并嵌入智能感知、大数据分析与控制算法等交叉模块。例如，在原有“电力系统分析”课程中，增设关于电压波动识别与建模的小专题；在“电力电子技术”课程中引入并网逆变器谐波注入机制的实验探究。

课程应分阶段设定能力培养目标。第一阶段侧重基础知识和理论体系的夯实；第二阶段聚焦关键技术与调控方法的系统学习；第三阶段通过课程设计与工程项目将理论应用于实际。以“电能质量综合治理设计”为毕业设计方向，可要求学生基于某一工业用户实际供电场景，完成监测方案设计、数据采集分析与调控装置选型等完整流程，提升工程实

践能力。

课程内容要紧跟技术前沿动态，引导学生理解电能质量问题的系统性与发展趋势。如引入“虚拟同步机与暂态调控”、“多源耦合下的瞬态波形异常识别”相关内容，使学生具备从源网荷储一体化视角分析电能质量的能力。

3.2 实践平台建设与项目驱动机制

建立与实际工程高度对接的实训平台是关键。建议建设“电能质量调控实验平台”，包括变负载装置、分布式能源模拟器、并网逆变器、APF、数据采集系统等，配合 MATLAB/Simulink 等工具，支持学生从问题识别到调控方案验证的全过程训练。

实践教学应以项目为驱动。例如，设置“特定负载引起的谐波问题诊断与调控”任务，学生通过分析扰动波形、设计控制参数、验证调控效果，提升综合应用能力。同时组织“电能质量挑战赛”，以典型异常波形为背景，限时提出治理策略并答辩，提升技术表达与反应能力。

3.3 产教融合与校企协同育人

强化产教融合是培养工程能力的重要环节。高校应联合电网公司、新能源企业等共建“电能质量协同育人基地”，由企业提供工程项目、典型数据及设备，师生共同参与项目开发。例如，某高校与电力公司共建实验站，学生参与园区谐波治理方案设计，接触实际数据、调控流程，深化对工程应用场景的理解。可探索“双导师制”机制，引入企业技术人员与高校教师共同指导项目设计，提升项目实用性。推动学生参与企业课题，如智能配电系统中的电压波动调控研究，提升实践与科研能力同步发展。

3.4 教师能力建设与教学融合机制

人才培养机制能否顺利实施，很大程度上取决于教师队伍的专业结构与教学能力。高校应优化教师团队配置，鼓励具有工程实践背景的教师主导实践教学模块，同时加强在职教师的继续教育与工程训练。可通过组织赴企业跟岗、参与工程项目、开展产业技术研究等方式，提升教师对电能质量调控技术的实际理解和系统思维能力。此外，应推动教学与科研深度融合，引导教师将科研成果转化为教学内容。例如，在“智能配电网故障识别”研究中形成的算法，可设计成课程专题教学模块，通过实际仿真案例带动学生掌握算法结构与应用逻辑。鼓励教师发表教改论文，建设案例库、教学资源平台和 MOOC 课程，为电能质量课程教学提供持续更新的知识基础。

4 结论与展望

在智能电网深度发展背景下，电能质量问题呈现出多源化、动态化、复杂化特征，对调控技术与人才能力均提出了更高要求。本文从电能质量问题的物理机制入手，系统分析了智能化调控路径的发展趋势，并提出了以课程重构、实践平台建设、产教融合和教师发展为核心的“理实一体化”人才培养机制。这一机制不仅有助于提升学生的综合应用能力和工程实践水平，也为高校教学改革和行业人才供给提供了参考路径。展望未来，随着数字化、智能化技术的不断深化，电能质量调控人才的培养仍需持续融合跨学科优势，强化前沿技术导入，构建更加开放、灵活和高效的育人体系。

参考文献：

[1] 付立国 . 光伏并网发电系统电能质量问题与治理策略研究 [J]. 电力设备管理 ,2025,(01):90–92.

[2] 王文星 . 智能电网中基于功率电子技术的电能质量控制与优化 [J]. 家电维修 ,2024,(11):107–109.

[3] 陈宇洋 , 白芸嘉 . 低压配电网中的电能质量问题及其解决策略 [J]. 工程技术研究 ,2024,9(21):171–173.

[4] 张二帅 . 配网电能质量优化技术研究 [J]. 光源与照明 ,2024,(10):234–236.

[5] 廉宁 , 李冰 . 智能电能表抽检质量问题分析及其寿命评估方法 [J]. 宁夏电力 ,2024,(05):64–69.

[6] 郭晓亮 . 中压配电系统电能质量治理分析 [J]. 电力设备管理 ,2024,(15):54–56.

[7] 刘飞 , 赵海玲 , 刘冬季 . 配电网低压电能质量问题的评估与应对策略 [J]. 电器工业 ,2024,(05):36–39+29.

[8] 徐军岳 , 柳毅 , 桂家娥 . 基于不平衡补偿的低压配电网电能质量问题及治理对策研究 [J]. 电气传动 ,2024,54(01):33–39.